

# 大口径多层介质膜光栅衍射效率测量 及其在制作工艺中的应用\*

周小为 刘颖 徐向东<sup>†</sup> 邱克强 刘正坤 洪义麟 付绍军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

(2011年12月21日收到; 2012年2月21日收到修改稿)

多层介质膜光栅是高功率激光系统的关键光学元件. 为了满足国内强激光系统的迫切需求, 在大口径多层介质膜光栅的研制过程中, 建立了单波长自准直条件下的衍射效率测量方法及其误差分析. 结果表明误差主要由探测器的噪声和测试人员的差异产生, 对衍射效率测试精度的影响是 $\pm 1\%$ . 在此基础上, 将光栅衍射效率及其分布测量技术应用于光栅制作工艺中, 作为大口径光栅无损检测的一种手段, 如判断光栅掩模是否能进行离子束刻蚀、离子束刻蚀的在线监测和是否需要再刻蚀, 从而实现对大口径多层介质膜光栅离子束刻蚀过程的定量、科学控制, 提高了离子束刻蚀光栅制作工艺的成功率. 利用上述技术, 已成功研制出多块最大尺寸为 $430\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ 、线密度 $1740\text{ 线/mm}$ 、平均衍射效率大于 $95\%$ 的多层介质膜光栅. 实验结果表明, 该方法操作简单、测量快速准确, 不必检测光栅微结构. 为大口径多层介质膜光栅研制的无损检测工程化奠定了基础.

**关键词:** 衍射效率, 多层介质膜光栅, 离子束刻蚀

**PACS:** 42.40.Lx, 42.79.Dj, 42.40.Eq

## 1 引言

建立在激光脉冲啁啾放大 (chirped-pulse amplification, CPA) 和压缩基础上的亚皮秒或皮秒超短脉冲激光器, 是目前研究快点火物理的唯一重要的驱动器. 从超强激光超短脉冲压缩对衍射光栅的要求可以看出, 高衍射效率、高损伤阈值、大口径和良好波前质量是脉宽压缩光栅的四个重要指标<sup>[1]</sup>. 为了得到高质量的脉冲压缩和放大, 光波在经过光栅前后保持高度的光学质量是很重要的, 这就要求光栅的衍射效率和相位在一个很大区域内的均匀性都要保持得很好, 相应地就对光栅槽型结构均匀性要求比较高. 多层介质膜光栅基于介质膜的干涉原理和表面光栅结构的衍射原理, 其结构设计更加灵活<sup>[2-4]</sup>. 近年来, 随着光栅制作技术的发展, 多层介质膜光栅已取代镀金光栅而广泛应用于 CPA

技术中.

无论是采用全息干涉光刻制作掩模, 还是采用扫描干涉光刻制作掩模, 离子束刻蚀几乎是制作多层介质膜光栅的最后一道工序<sup>[5,6]</sup>. 只有满足一定要求的光刻胶光栅掩模才能进入离子束刻蚀, 例如栅线高度 (槽深)、占空比、线条尽量光滑、无底膜 (露底)、均匀性等, 以保证刻蚀后的光栅落在高衍射效率区<sup>[7]</sup>. 不满足要求的光刻胶光栅掩模需返工重新制作掩模, 否则离子束刻蚀之后结果不理想, 只得重新加工基片、镀膜. 因此, 大口径多层介质膜光栅制作工艺中光栅掩模有效、可靠的检测显得十分重要, 这也是限制其发展及提高性能和成品率的瓶颈问题之一. 有关大口径多层介质膜光刻胶光栅掩模的检测方法和手段, 美国 LLNL, PGL, 法国 J-Y 等制造商没有透露任何信息. 原则上, 大口径多层介质膜光栅制作工艺中只能使用非破坏性手段和方法进行检测, 如光学显微镜<sup>[8]</sup>、原子力显微

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA1416) 和国家自然科学基金 (批准号: 10875128) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xxd@ustc.edu.cn

镜(带有大的扫描机构)<sup>[9]</sup>、衍射度量术<sup>[10]</sup>,无法使用破坏性的扫描电子显微镜进行检测.在863-804资助下,我们于2002年5月开始了多层介质膜光栅研究工作.通过多年工作发现,光栅的全口径衍射效率及其分布除了能表征光栅的性能外,还可推测光栅掩模是否符合离子束刻蚀要求,因而对衍射效率进行精确测量具有非常重要的意义.

目前,最为精密的多层介质膜光栅衍射效率测量方法是腔精细度法(cavity-finesse method),它是为了满足用于激光干涉空间天线和引力波天文台基线光栅干涉仪的性能目标要求<sup>[11]</sup>.作为多层介质膜光栅制作工艺过程控制的衍射效率测量是不必如此精密的测量,而且与常规光栅衍射效率测试方法<sup>[12]</sup>不同的是,只要测量单波长(工作波长)自准直(Littrow角)条件下的衍射效率及全口径分布均匀性即可.本文给出了大口径多层介质膜光栅制作工艺中衍射效率精确测量方法及其误差分析,开展了衍射效率测量在光栅掩模判断、离子束刻蚀在线监测和是否需要再刻蚀等制作工艺中的应用,获得了较为理想的实验结果.本工作为大口径多层膜光栅研制的无损检测工程化奠定了基础.

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置和参数

大口径多层介质膜光栅衍射效率的测量光路如图1所示.激光经过半透半反镜(BS)后,反射光被探测器1(D<sub>1</sub>)接收作为参考光(消除激光器光强不稳定带来的测量误差);透射光入射到被测多层膜光栅上,-1级衍射光偏离自准直角1°—2°(为避免衍射光再次经过半透半反镜),被探测器2(D<sub>2</sub>)接收;同时加入了电子快门(ES),减少探测器的热疲劳效应.为了保证光源波长的纯洁度,在半透半反镜前光路中加入一光栅(Gr),以滤掉激光器中含有的其他波长如808 nm等.实验中所采用的激光器为长春新产业生产的MIL-LLL半导体激光器,波长为1064 nm,偏振模式:TEM<sub>00</sub>,偏振比:>100:1,偏振方向:TE;功率:>1500 mW;光斑直径约2 mm;功率稳定性1%;探测器为以色列OPHIR公司的激光探头,型号:PD-300-1W,在1064 nm的测试精度:±5%,(其中包括随温度变化的影响);探测器有效尺寸10 mm×10 mm;不同位置对光的响应波动:±2%.光栅安放在二维移动

的样品台上,实现全场扫描测量.

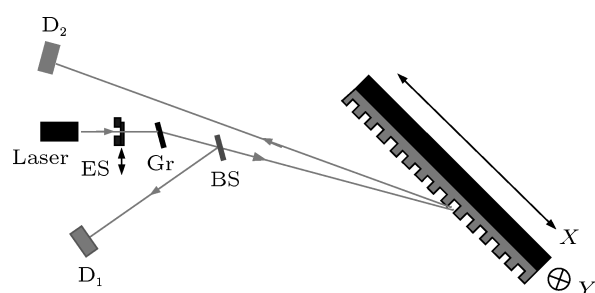


图1 大口径多层介质膜光栅效率测试系统示意图

### 2.2 衍射效率测量

光栅衍射效率测量的基本步骤是:首先调节激光器的俯仰,使出射光水平,确认激光器的TE偏振模式;调节光栅的俯仰,使光栅线条垂直于入射面;调节入射角,使衍射光接近于入射角,在水平方向上有1°—2°的角度偏差,使其偏离半透半反镜,被探测器2(D<sub>2</sub>)接收.然后用探测器D<sub>2</sub>测量经过半透半反镜的透射光强度A<sub>0</sub>,D<sub>1</sub>测量半透半反镜的反射光强度B<sub>0</sub>,计算二者的比值A<sub>0</sub>/B<sub>0</sub>=K<sub>0</sub>.最后进入光栅衍射效率测量.在快门关闭的情况下启动步进电机将光栅移动到需要测量的位置点(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>),打开快门,经过时间t后关闭快门;光栅移动到下一位置点(x<sub>2</sub>, y<sub>1</sub>),打开快门,经过时间t后关闭快门,以此往复,直到自动扫描完整个光栅.记录各个点的衍射光强A<sub>ij</sub>与参考光强B<sub>ij</sub>的比值K<sub>ij</sub>.光栅上各点衍射效率:η<sub>ij</sub>=K<sub>ij</sub>/K<sub>0</sub>.整个过程由计算机进行硬件控制(快门、步进电机)和数据分析处理.

### 2.3 误差分析

#### 2.3.1 激光器偏振状态的影响

考虑到多层介质膜光栅在CPA中的应用,所设计的介质膜光栅的偏振态为TE模式,基本参数如下:使用波长1053 nm,顶层氧化硅厚度431 nm,线密度1740线/mm,自准直入射角度66.7°,最佳占空比0.35,槽深>220 nm.针对这些参数计算的多层介质膜光栅对TE和TM两个偏振方向的-1级衍射效率差异明显,如图2所示.因此,通过预检测结果也可判断激光器的偏振状态是否正确.如果激光器的偏振不完全是TE偏振,该偏差会造成测量的效率偏低.

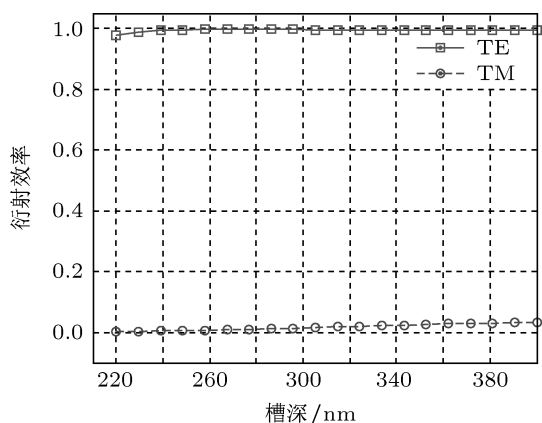


图2 设计的多层膜光栅对 TE 和 TM 的 -1 级衍射效率曲线

### 2.3.2 不完全是自准直入射的影响

通过对固定槽深和占空比的多层介质膜光栅不同入射角时衍射效率变化计算表明, 入射角偏离自准直方向  $\pm 2^\circ$  以内时, 衍射效率与自准直方向的衍射效率偏差很小 (0.3%以内), 结果如表 1 所示.

表 1 槽深 380 nm、占空比 0.4 的多层介质膜光栅  
不同入射角时的衍射效率

使用波长/nm	入射角/( $^\circ$ )	-1 级衍射效率/%
1064	65.7694	98.92
1064	66.7694	99.13
1064	67.7694	99.19
1064	68.7694	99.13
1064	69.7694	98.96

### 2.3.3 人员及探测器感光面不同位置对光的响应不同带来的影响

由于探头表面不同位置和角度时光电响应存在一定的偏差, 会影响系统检测时入射光与参考光的比值  $K_0$  和衍射光强和参考光强比值  $K_{ij}$ , 使衍射效率的测量值和真实值存在一定的偏差. 为确定人员因素和探测器噪声两者对采集效率的影响, 按图 1 进行光路搭建,  $D_2$  移动到正对半透半反镜后面的透射光路中, 电子快门开关频率为 1 Hz.  $D_1$  调节好之后保持不动, 让两个人进行操作, 分别移动  $D_2$  找出透射光的最大值, 静止后进行两组数据采集 (每组数据采集两次, 即同样条件下连续测量两次, 标记为 B 和 C), 采集数据为透射光和反射光的比值. 实验人员 1 调节探头  $D_2$ , 得到实验数据 Data 1, (包括两组数据 B 和 C); 再次移动  $D_2$ , 找出最大比值, 得到实验数据 Data 2; 实验人员 2 以

同样的方法得到数据 Data 3 和 Data 4, 实验结果如图 3 所示.

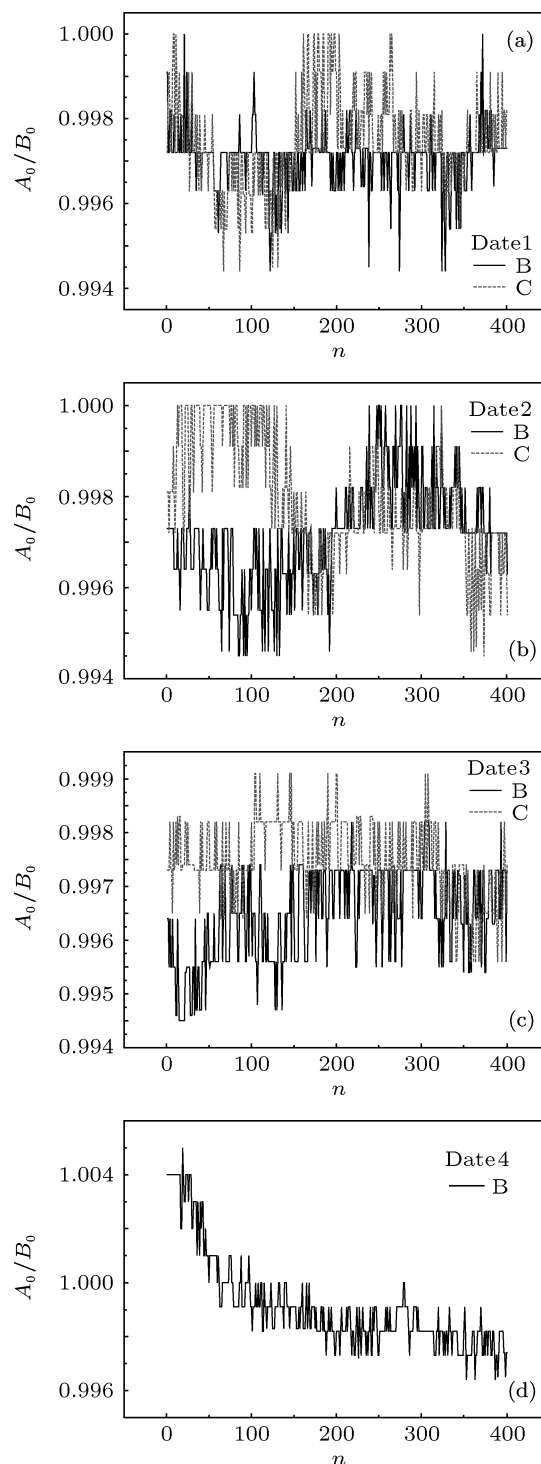


图 3 不同人员及不同时间的探测器响应曲线 (a) 人员 1 测量数据; (b) 人员 1 移动  $D_2$  后再次测量数据; (c) 人员 2 测量数据; (d) 人员 2 移动  $D_2$  后再次测量数据

从误差分析来看, 接近于 1 的  $A_0/B_0$  随时间的变化漂移量仅仅只有  $\pm 0.44\%$ , 平均漂移在  $\pm 0.28\%$ . 测量结果可信. 探测器本身的噪声影响

造成测量误差为:  $\pm 0.44\%$ ; 不同人操作带来的最大偏差:  $\pm 0.5\%$ . 这两个因素对每一个测试数据的影响能控制在  $\pm 0.5\%$  以内, 测量效率中会出现两次测量 (入射光和衍射光), 所以, 这两个因素在衍射效率测试精度的影响是  $\pm 1\%$ .

### 3 衍射效率精确测量在制作工艺中的应用

多层介质光栅膜系的设计和镀制由中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术研发中心承担. 膜系结构为 SH3L (H2L)<sup>9</sup> HTA, 其中 H 和 L 分别是光学厚度分别为四分之一波长 (840 nm) 的  $\text{HfO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ , 对应物理厚度分别为 107.1 nm 和 143.8 nm, S 为半无限大 K9 基底, A 为半无限大空气层, T 为物理厚度 431.5 nm 的  $\text{SiO}_2$  (光学厚度为  $3L$ ), 在其上刻蚀线密度为 1740 线/mm 的光栅, 设计的多层介质膜光栅 -1 级衍射效率与占空比和槽深的关系如图 4 所示. 由图 4 可知, 多层介质膜光栅槽型结构参数 (占空比、槽深) 组合落在不同的区域其衍射效率亦不同, 其中的白区区域衍射效率高于 99%. 最佳占空比为 0.35, 较好的占空比范围为 0.3—0.45.

多层介质膜光栅的离子束刻蚀工艺流程图 5

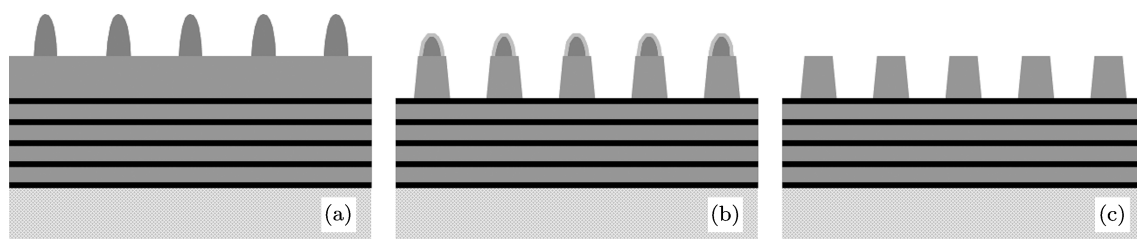


图 5 离子束刻蚀多层介质膜光栅制作工艺 (a) 光刻胶光栅掩模检测; (b) 扫描离子束刻蚀图形转移; (c) 清洁处理

#### 3.1 光栅掩模判断

正式的大口径多层介质膜光栅掩模的槽型结构检测, 只能使用非破坏性手段和方法进行检测. 迄今为止, 已有的文献中还没有出现一种有效的近于工程应用的手段和方法. 通过多年的工作, 我们建立了光学显微镜和衍射效率测量进行光栅掩模判断的经验性检测方法, 该方法是一种最接近于工程应用的有效方法. 首先用光学显微镜对光栅掩

模进行初检, 检查掩模是否露底 (栅槽中无光刻胶残余), 然后对光刻胶光栅掩模的衍射效率分布进行测量 (二维) 以判断掩模是否合格, 即是否能刻蚀出均匀的高衍射效率的多层介质膜光栅, 合格的光栅掩模才能进入离子束刻蚀. 衍射效率用于光栅掩模结构判断的物理基础是: 光栅基底的多层膜堆对 1064 nm 波长 Littrow 角情况下反射率变化很小 ( $\sim 0.3\%$ ), 光刻胶光栅掩模的 -1 级衍射效率 (1064 nm 近 Littrow 角) 可看作仅由它的结构参

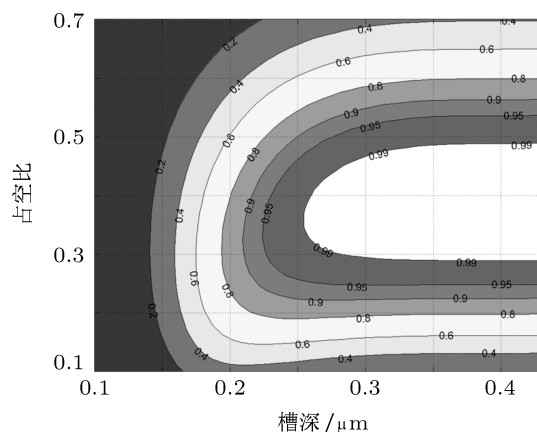


图 4 -1 级衍射效率与占空比和槽深的关系

模进行初检, 检查掩模是否露底 (栅槽中无光刻胶残余), 然后对光刻胶光栅掩模的衍射效率分布进行测量 (二维) 以判断掩模是否合格, 即是否能刻蚀出均匀的高衍射效率的多层介质膜光栅, 合格的光栅掩模才能进入离子束刻蚀. 衍射效率用于光栅掩模结构判断的物理基础是: 光栅基底的多层膜堆对 1064 nm 波长 Littrow 角情况下反射率变化很小 ( $\sim 0.3\%$ ), 光刻胶光栅掩模的 -1 级衍射效率 (1064 nm 近 Littrow 角) 可看作仅由它的结构参

数决定,即光栅的衍射效率及其分布反映了光栅掩模的槽型结构及其变化<sup>[13,14]</sup>.

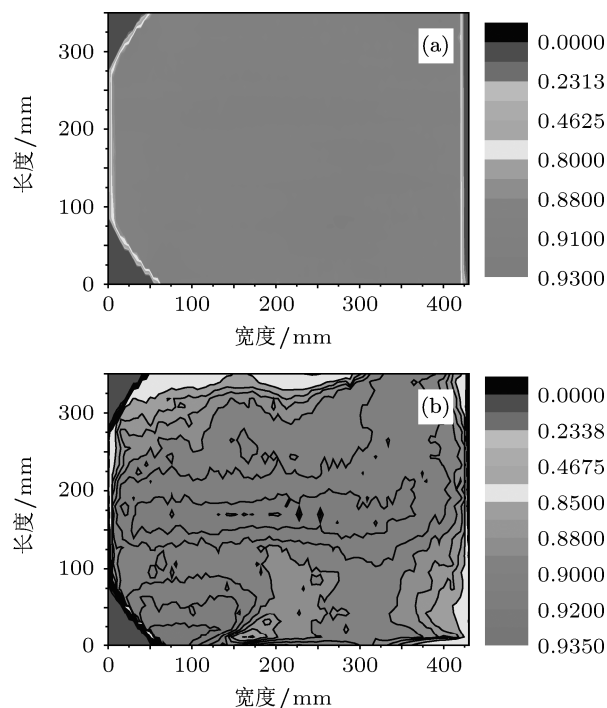


图6 多层介质膜光栅掩模的衍射效率分布 (a)1#光栅掩模; (b)2#光栅掩模

全息光栅掩模的制作涉及多步工艺,如基片清洁处理、光刻胶涂布、前烘、全息曝光和显影、后烘等.影响光栅掩模槽型结构及其均匀性因素很多而难以严格控制,如大尺寸矩形基片光刻胶涂布均匀性,厚基片的前烘温度梯度和时间控制,全息曝光时两相干光强的均匀性和平衡性、隔震平台稳定性,显影液浓度和温度梯度产生的不均匀性控制等,都有可能影响到光栅的重复性和衍射效率的均匀性,这些就是全息光栅掩模制作的难度所在.对于优化的 $\text{CHF}_3$ 反应离子束刻蚀参数, $\text{SiO}_2$ 与光刻胶的刻蚀速率比为2:1,240 nm高度的光刻胶掩模就能刻蚀480 nm的 $\text{SiO}_2$ 槽深.由文献[13]可知,为了保证曝光、显影后的光刻胶光栅掩模占空比满足刻蚀后光栅槽型结构落在高衍射效率范围内,光刻胶膜层厚度选择为400—600 nm.在优化和稳定的工艺条件下,通过显影监测获得的光栅掩模占空比为0.25—0.50,光刻胶光栅掩模的衍射效率大于80%.如果工艺条件不稳定,为了保证都显影露底,曝光量大的区域光刻胶光栅掩模的占空比变小,光刻胶厚度损失较多,光刻胶光栅掩模的衍射效率较低,均匀性变差.图6是尺寸为430 mm×350 mm光刻胶光栅掩模的全口径衍射

效率分布图,图中左边圆弧是曝光系统准直透镜口径所致,使得左边上下两个三角形区域未曝光,即无光栅图形.图6(a)是1#光栅掩模的衍射效率测量结果,效率高(>90%)且分布均匀,反映全口径光刻胶涂布厚度基本均匀一致,曝光、显影条件和控制合适;图6(b)是2#光栅掩模的衍射效率测量结果,衍射效率较高(>80%),分布不均匀有梯度.这主要是由于涂胶时没有完全密封,气流扰动导致光刻胶涂布厚度不均匀,如上部、右边边缘和中下部(125—250 mm处).相同的曝光、显影条件下,不同厚度光刻胶的槽型结构(占空比、槽深)会有一些的差异,从而导致衍射效率变化.

### 3.2 离子束刻蚀在线监测

大口径光栅的离子束刻蚀通常采用扫描方式,即光栅平行于条形离子源往返扫描运动,往返扫描刻蚀一次称为一个周期.在线监测光路与衍射效率光路相近(激光波长1064 nm,近自准直),在垂直于光栅线条方向上沿光栅某一位置线扫描,探测的信号为光栅-1级衍射光强.检测过程中可认为入射的激光光强是常数,那么,被刻蚀光栅的-1级衍射效率与其-1级衍射光强度的变化趋势一致,两者仅相差入射激光光强这一常数,可以用光栅-1级衍射强度的测量代替光栅-1级衍射效率的测量.通过实时监测刻蚀过程中光栅衍射光强(效率)的变化可以确定其离子束刻蚀终点<sup>[15,16]</sup>,如图7所示.图7(a)是在线监测得到的光栅-1级衍射光强度随刻蚀时间的变化的一个典型曲线.此光栅被刻蚀了12个周期,共在线监测了13次光栅一维衍射强度分布,对应图中的部分为 $T_0, T_1$ 和 $T'_1, T_2$ 和 $T'_2, \dots, T_{11}$ 和 $T'_{11}, T_{12}$ 和 $T'_{12}$ (退出和进入离子束区域往返测量2次,光射强度空间分布呈左右对称),其中 $T_0$ 是在刻蚀之前,在线监测得到的初始光刻胶光栅掩模的-1级衍射光强度.图中虚线给出了刻蚀过程中光栅衍射强度的整体变化趋势:衍射强度先下降,然后整体呈现逐渐上升的趋势,最后呈平缓、饱和的趋势,此阶段可选为刻蚀终点.这一变化趋势的物理过程是:刻蚀过程中光刻胶光栅掩模高度降低、宽度收缩导致占空比变小,多层介质膜光栅逐渐形成.初始阶段的衍射效率主要是由光刻胶光栅掩模贡献,所以衍射效率下降;随着刻蚀加深,多层介质膜光栅衍射效率逐渐增加,当刻蚀的槽型结构参数组合都落入高效率区域时就不

会再增加了,如图4所示.图7(b)显示了不同刻蚀周期-1级衍射强度的空间分布变化,它是由图7(a)中对应刻蚀周期后的光栅衍射强度在线监测曲线展宽叠加在一起而成,图中初始光刻胶光栅掩模-1级衍射光强空间分布( $T_0$ )极其不均匀,左边低右边高(主要由初始光刻胶光栅掩模的高度和占空比的不同而引起).刻蚀进程中不同位置上光栅-1级衍射强度随刻蚀时间变化趋势差异较大,但最终光栅衍射强度均达到最大且空间上分布均匀.这是因为刻蚀光栅的深度和占空比均落在设计的高衍射效率范围内,随着刻蚀深度的增加各点的衍射效率越来越高,最终接近一致.高衍射效率对应的光栅槽型占空比和深度宽容度较大是离子束刻蚀在线监测方法可行的物理基础.

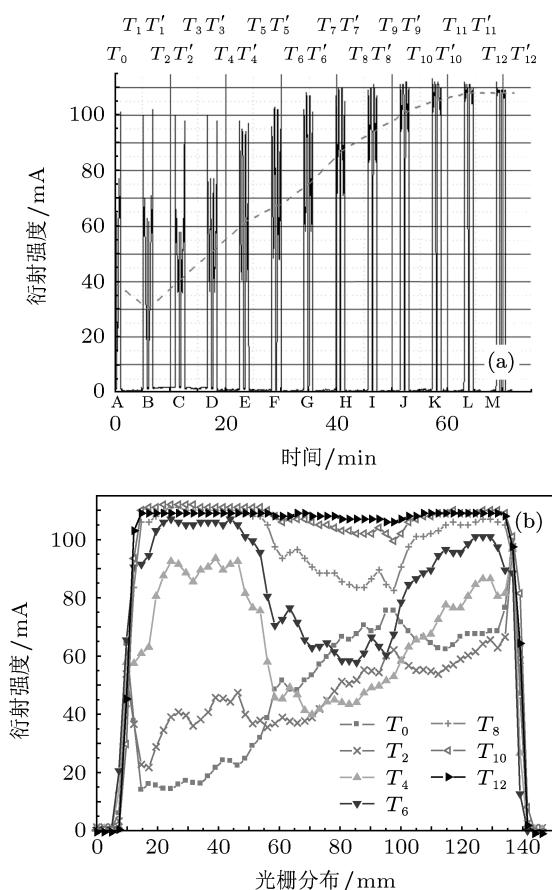


图7 光栅样品的负一级衍射强度扫描刻蚀在线监测曲线 (a) 随时间变化曲线; (b) 空间分布变化曲线

### 3.3 是否需要继续刻蚀

离子束刻蚀在线监测的只是一条线上的光栅衍射效率变化,并不反映全口径衍射效率高及均匀性.因此,达到刻蚀终点的光栅取出后先不要去

除残余光刻胶光栅掩模(如图5(b)),而是进行全口径衍射效率测量,以判断是否需要继续刻蚀.

对于衍射效率高且均匀的光栅掩模,离子束在线监测达到终点时的刻蚀光栅衍射效率也高且均匀.图8(a)是图6(a)所示光栅掩模扫描刻蚀8.5个周期后取出衍射效率测量结果,右上角出现一局部的低衍射效率区,-1级衍射效率平均值为93.2%,衍射效率均匀性RMS为4.67%;光栅衍射效率不够理想,经显微镜检查掩模还有光刻胶,又放入刻蚀机中扫描刻蚀1个周期,衍射效率测试结果如图8(b)所示,-1级衍射效率平均值为95.49%,衍射效率均匀性RMS为0.87%.

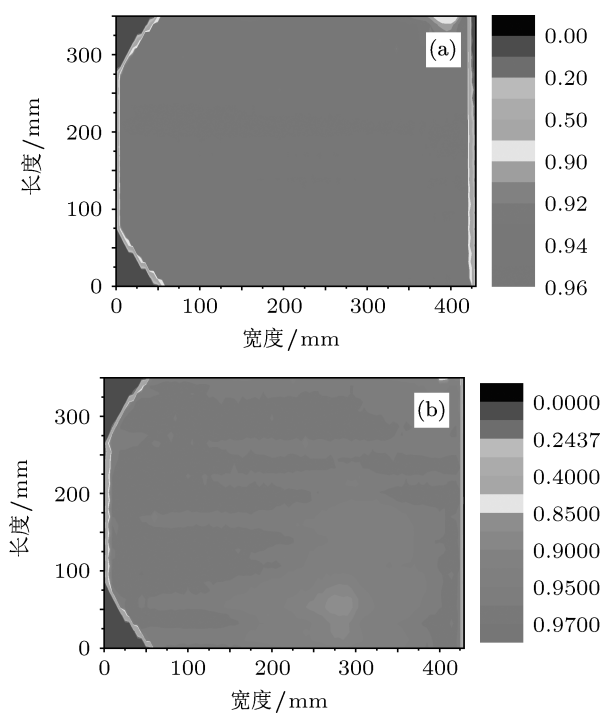


图8 1#光栅刻蚀后的衍射效率分布 (a) 扫描刻蚀8.5个周期; (b) 扫描刻蚀9.5个周期

对于全口径衍射效率较高、不是很均匀的光栅掩模,离子束在线监测达到终点后的刻蚀光栅衍射效率也高.图9(a)是图6(b)所示光栅扫描刻蚀10个周期后的结果,从图中可以看出刻蚀后光栅衍射效率分布已经发生变化,中央部分变化不大,光栅两侧变低,总体均匀性变差.这样的结果显然不符合要求,经显微镜下观测还存在一定厚度的光刻胶光栅掩模,可以继续刻蚀.图9(b)是相同条件下再次扫描刻蚀2个周期后光栅的衍射效率分布,-1级衍射效率平均值达到96.6%,衍射效率均匀性RMS为0.5%.

在以上两组刻蚀试验中,衍射效率高且均匀的

光栅掩模刻蚀后得到的光栅 -1 级衍射效率平均值及效率均匀性 RMS 均低于衍射效率较高、不是很均匀的光栅掩模刻蚀后的光栅. 从图 10 刻蚀后光栅衍射效率统计分布及图 4 衍射效率与槽型结构关系, 我们可以分析形成此结果的可能原因如下: 衍射效率高且均匀的光栅掩模是工艺优化和稳定条件下的结果, 全口径范围内的光刻胶光栅掩模槽深和占空比基本一致, 初始光刻胶厚度损失较小, 占空比在 0.5 或 0.25 附近, 所以刻蚀后的光栅衍射效率最大分布为 97%, 没有出现在图 4 白色区域内的更高衍射效率. 衍射效率较高、不是很均匀的光栅掩是由于存在光刻胶膜厚、多层膜反射率、两干涉光束曝光光强分布、隔振平台、光学系统和光栅基片稳定性等差异造成的 (一般情况下, 这些差异大多是无法控制的), 全口径范围内的光刻胶光栅掩模槽深和占空比不一致, 有的区域初始光刻胶厚度损失较大, 占空比大小都在 0.25—0.5, 所以刻蚀后的光栅衍射效率最大分布为 98%, 有少量出现在图 4 白色区域内的衍射效率即 99%. 由于工艺及测量误差存在, 不可能制作出设计为 100% 衍射效率的理想光栅. 平均衍射效率越高越接近于理想值, 其效率均匀性的 RMS 也就越小, 这已从制作的多块光栅中得到证实.

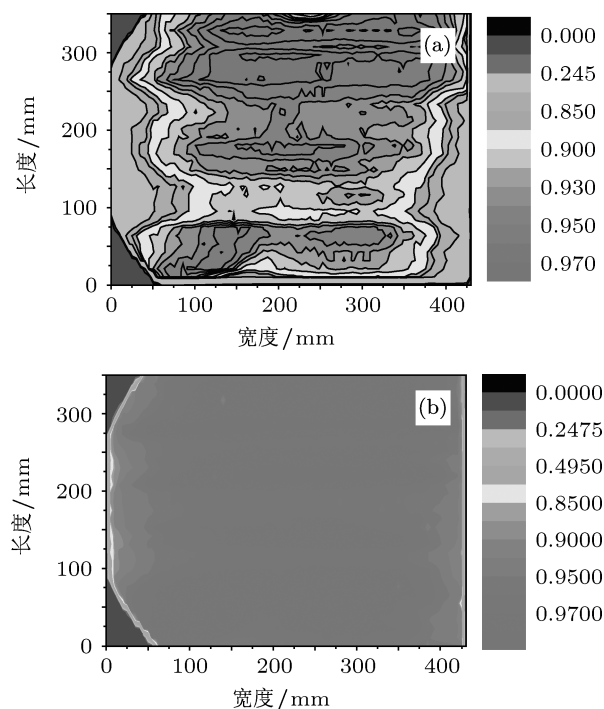


图 9 2#光栅刻蚀后的衍射效率分布 (a) 扫描刻蚀 10 个周期; (b) 扫描刻蚀 12 个周期

对于占空比  $< 0.2$  的低衍射效率光刻胶掩模,

无论如何都刻蚀不出高衍射效率的光栅; 对占空比合适 0.25—0.45 的低衍射效率光刻胶掩模, 优化工艺条件下可以刻蚀出高衍射效率的光栅. 所以对全口径衍射效率较低 ( $< 30\%—60\%$ ) 及不均匀的光栅掩模, 通过离子束在线监测达到终点后的刻蚀光栅衍射效率可能高, 也可能不高, 刻蚀的宽容度较低, 风险很大, 建议重新制作掩模.

从刻蚀完成后的光栅样品衍射效率图上, 可以或多或少看出一些呈平行于光栅基底长边 (垂直于光栅线条方向) 的带状分布, 具体成因不详, 也许是此类大口径光栅制作工艺过程形成的共性如文献 [5] 中图 5 所示相似. 刻蚀结束后的光栅样品还需要进行清洁处理去除残余物以提高损伤阈值 [17] 和衍射效率测量, 然后提交给用户.

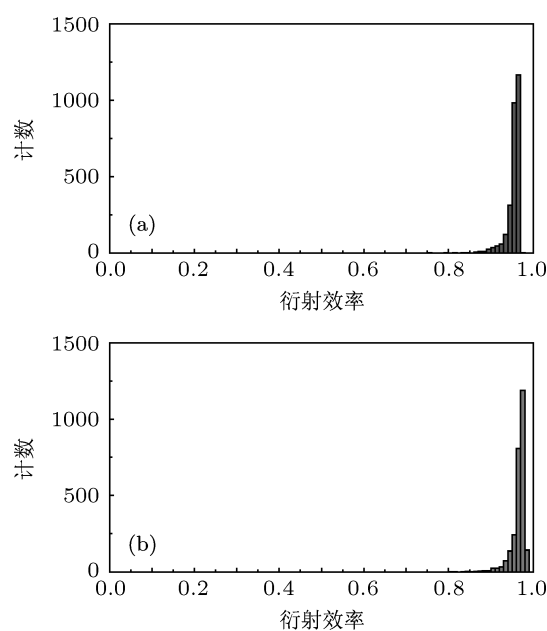


图 10 光栅刻蚀后的衍射效率统计分布 (a) 1#光栅; (b) 2#光栅

## 4 结论

本文介绍了单波长自准直条件下的二维衍射效率测量方法, 误差分析结果表明, 探测器本身噪声和不同人员操作是其主要偏差, 它们对衍射效率测试精度的影响是  $\pm 1\%$ , 测量结果可信. 除了对光栅性能表征外, 衍射效率测量还可应用于多层介质膜光栅刻蚀制作工艺过程中, 作为一种无损检测手段. 由本文的实验结果及其分析, 得到的结论如下:

1. 衍射效率高 ( $> 90\%$ ) 且均匀分布的光栅掩模是最佳的光栅掩模, 其次是总体衍射效率较高

(> 80%) 的光栅掩模都可以定为合格掩模;

2. 总体衍射效率偏低且不均匀 (< 30%—60%) 的光栅掩模基本定为不合格掩模, 因刻蚀的宽容度较低, 相对风险大, 建议重新制作掩模;

3. 根据 -1 级衍射光强 (等价与衍射效率) 的变化趋势来选取刻蚀终点, 即衍射强度先下降, 然后整体呈上升趋势, 当不再上升或略有下降时为刻蚀终点;

4. 刻蚀后的光栅先不要去胶, 而是进行全口径

衍射效率测量, 以判断是否需要继续刻蚀. 当衍射效率不够高或不均匀时, 只要掩模还有胶存在就可以再次刻蚀, 直到衍射效率和均匀性进一步提高.

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术研发中心晋云霞课题组提供的介质膜光栅设计, 盛斌博士、博士生陈上碧、陈火耀和实验员黄俊等在光栅刻蚀、清洗及效率测量方面的部分工作.

- [1] Xu X D, Hong Y L, Lu Y, Fu S J 2005 *Physics* **34** 748 (in Chinese) [徐向东, 洪义麟, 刘颖, 付绍军 2005 物理 **34** 748]
- [2] Kong W J, Liu S J, Shen J, Shen Z C, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1143 (in Chinese) [孔伟金, 刘世杰, 沈健, 沈自才, 邵建达, 范正修 2006 物理学报 **55** 1143]
- [3] Kong W J, Yun M J, Sun X, Liu J H, Fan Z X, Shao J D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4904 (in Chinese) [孔伟金, 云茂金, 孙欣, 刘均海, 范正修, 邵建达 2008 物理学报 **57** 4904]
- [4] Kong W J, Wang S H, Wei S J, Yun M J, Zhang W F, Wang X J, Zhang M M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114214 (in Chinese) [孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 云茂金, 张文飞, 王心洁, 张蒙蒙 2011 物理学报 **60** 114214]
- [5] Nguyen H T, Britten J A, Carlson T C, Nissen J D, Summers L J, Hoaglan C R, Aasen M D, Peterson J E, Jovanovic I 2005 *SPIE* **5991** 59911M
- [6] Plymouth Grating Laboratory. <http://www.plymouthgrating.com/index.htm> [2011-12-12]
- [7] Xu X D, Hong Y L, Fu S J, Wang Z S 2004 *Physics* **33** 340 (in Chinese) [徐向东, 洪义麟, 付绍军, 王占山 2004 物理 **33** 340]
- [8] Xu X D, Liu Z K, Qiu K Q, Liu Y, Hong Y L, Fu S J 2011 *Acta Opt.Sin.* **31** 1005008 (in Chinese) [徐向东, 刘正坤, 邱克强, 刘颖, 洪义麟, 付绍军 2011 光学学报 **31** 1005008]
- [9] Britten J A, Molander W, Komashko A M, Bart C P J 2004 *SPIE* **5273** 1
- [10] Wei S M, Li L F 2008 *Appl. Opt.* **47** 2524
- [11] Lu P P, Sun K X, Byer R L, Britten J A, Nguyen H T, Nissen J D, Larson C C, Aasen M D, Carlson T C, Hoaglan C R 2009 *Opt. Lett.* **34** 1708
- [12] Kou J T, Bayanheshig, Tang Y G, Qi X D, Yu H Z 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0705002-1 (in Chinese) [寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国, 齐向东, 于宏柱 2011 光学学报 **31** 0705002]
- [13] Chen X R, Li C M, Wu J H, Hu Z Y 2010 *SPIE* **7849** 78491Y
- [14] Hehl K, Bischoff J, Mohaupt U, Palme M, Schnable B, Wenke L, Bödefeld R, Theobald W, Welsch E, Sauerbrey R, Heyer H 1999 *Appl. Opt.* **38** 6257
- [15] Lin H, Li L F, Zeng L J 2005 *Chinese Opt. Lett.* **3** 63
- [16] Liu Y, Xu X D, Hong Y L, Xu D Q, Fu S J ZL 2007 1 0020220.0 (in Chinese) [2010-02-24] [刘颖, 徐向东, 洪义麟, 徐德权, 付绍军 ZL 2007 1 0020220.0 [2010-02-24]]
- [17] Chen S B, Sheng B, Qiu K Q, Liu Z K, Xu X D, Liu Y, Hong Y L, Fu S J 2011 *High Power Laser & Partical Beams* **23** 2106 (in Chinese) [陈上碧, 盛斌, 邱克强, 刘正坤, 徐向东, 刘颖, 洪义麟, 付绍军 2011 强激光与粒子束 **23** 2106]

# Diffraction efficiency measurement of large aperture multilayer dielectric grating and its application in the fabrication process\*

Zhou Xiao-Wei Liu Ying Xu Xiang-Dong<sup>†</sup> Qiu Ke-Qiang Liu Zhen-Kun  
Hong Yi-Ling Fu Shao-Jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

(Received 21 December 2011; revised manuscript received 21 February 2012)

## Abstract

Large aperture multilayer dielectric grating (MDG) is one of the key elements of high-power laser systems. In order to meet the requirements for large aperture MLG in a high-power laser system, a diffraction efficiency measurement system is developed for characterizing the diffraction efficiency of large MDG at 1064 nm and Littrow mounting. Through analyzing the main factors such as detector signal-to-noise ratio and operating staff, which influence the testing results during measurement, their difference is obtained to be less than  $\pm 1\%$ , which proves that the method can be used to measure the diffraction efficiency of MDG. Based on a large number of experimental data, the optical characterization of MDG in a negative first-order Littrow configuration could provide some information about grating microstructure. So the diffraction efficiency measurements have a number of important applications in the fabrication process, as a nondestructive grating inspection tool, such as determining the suitable photoresist grating mask which meet the ion beam etching requirements, on line end-point detection during ion beam etching, and judging whether another etching is needed. Based on above techniques, a number of MDGs have been achieved, each of which has mean diffraction efficiency greater than 95% line density 1740 lines/mm, and aperture up to 430 mm $\times$ 350 mm. The results show that this method can satisfy the requirements for simple operation, testing speediness and preciseness, in which any inspection is not necessary for the MDG microstructure parameters.

**Keywords:** diffraction efficiency, multilayer dielectric grating, ion beam etching

**PACS:** 42.40.Lx, 42.79.Dj, 42.40.Eq

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA1416), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10875128).

<sup>†</sup> E-mail: xxd@ustc.edu.cn